Elektronenbuizen

In 2021 een artikel over de werking van elektronenbuizen? Ja, waarom niet? Er zijn een heleboel bouwpakketjes met buizen en heel dure eindversterkers met buizen in de handel. Een beetje basiskennis over de werking van buizen is ook nu dus nog nuttig voor iedere elektronica hobbyist.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 08-06-2021

Kennismaking met het onderdeel elektronenbuis

De elektronenbuis is alles behalve dood!
Wie denkt dat in de moderne tijd van chip's en SMD-componenten de elektronenbuis uitsluitend in het museum thuis hoort heeft het mis. Even googlen met de zoekterm '*tube diy kit*' levert een heleboel hits op naar voornamelijk Chinese leveranciers die bouwpakketjes rond buizen op de markt brengen. Dat het hierbij hoofdzakelijk gaat over audio-projecten zal geen verbazing wekken. Audiofielen met een zelfverklaard superieur gehoor beweren dat de vervorming die buizen introduceren in een audiosignaal niet is te vergelijken met de vervorming van halfgeleiders en dat audio uit buizen-elektronica veel mooier klinkt dan audio uit transistor schakelingen. In de onderstaande foto hebben wij een aantal van die pakketjes bij elkaar gebracht.



Een selectie uit de talloze audio bouwpakketten met buizen die nog steeds worden aangeboden.
(© 2021 Jos Verstraten)

Let op voor fake-aanbiedingen!
Bij sommige van die bouwpakketjes dienen de elektronenbuizen echter uitsluitend als versiering. Dat wil zeggen dat de elektronica werkt met transistoren of op-amp's en dat er alleen een blauw LED'je onder de niet aangesloten buisvoeten is gemonteerd. De buizen stralen daardoor een onnatuurlijk blauw licht uit, want dat is écht niet de kleur van een werkende buis!

Heel dure eindversterkers met buizen
Naast deze goedkope bouwpakketten met buizen bestaat er nog een categorie producten voor '*de enige echte audiofielen*' die vaak bereid zijn duizenden euro's uit te geven aan buizenversterkers, zoals aan het onderstaande model SQ-N150 van Luxman waarvoor u €

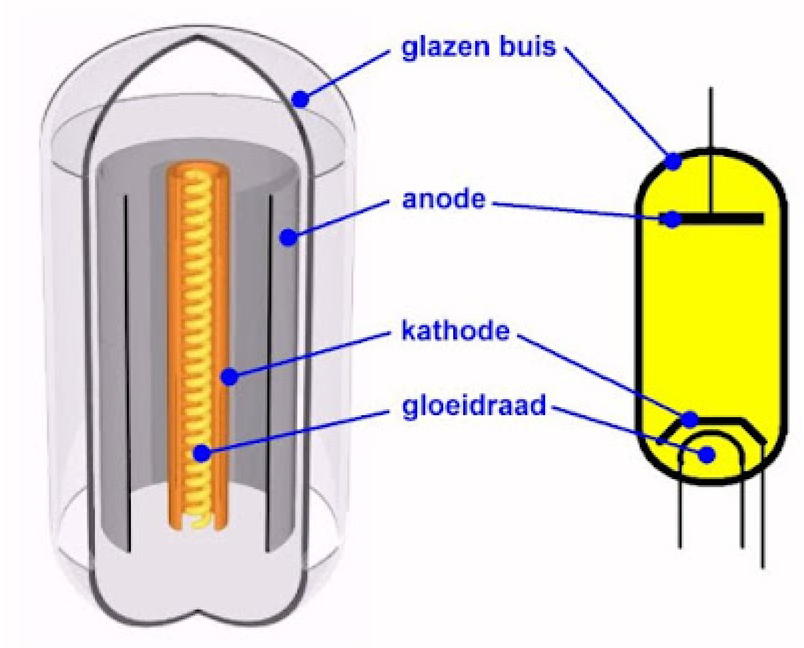
3.499,00 moet neertellen. U krijgt dan een versterker met een uitgangsvermogen van slechts 2 x 10 W.



Een vrij duur lekkerbekje voor de echte audio epicurist.
(© Luxman Corporation)

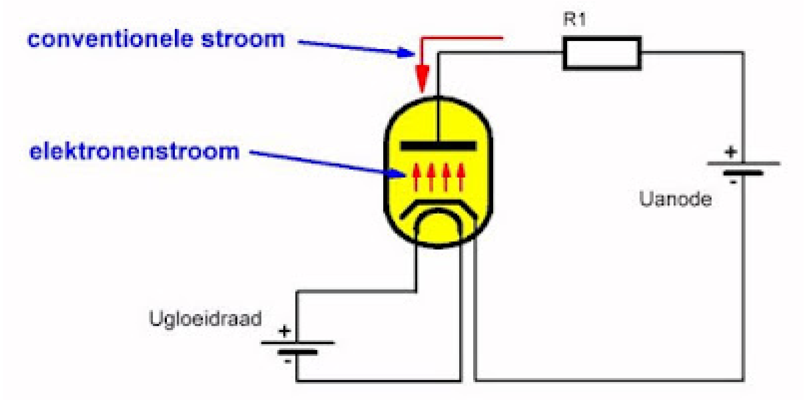
Nieuwe fabrikanten van oude buizen
De elektronenbuis is, net zoals de platenspeler, aan een revival begonnen. Op dit moment zijn er kleine bedrijven actief die de productie van de bekendste en beroemdste buistypen weer ter hand hebben genomen. Een van de bekendste bedrijven op dit gebied is JJ Electronics uit Slowakije, die in 1993 begonnen is met een eigen productielijn waarmee een stuk of dertig buizen worden geproduceerd.

De diode: de fundamentele opbouw van een elektronenbuis
De eenvoudigste elektronenbuis (tube in het Engels) bestaat uit een afgesloten glazen buis waaruit alle lucht is verwijderd. Deze buis is dus vacuüm gezogen. Om ervoor te zorgen dat werkelijk alle luchtmoleculen uit de buis verdwijnen is er een gasbinder in de buis aanwezig, een zogenaamde '*getter*'. Als bindmateriaal worden reactieve stoffen gebruikt zoals magnesium, barium of rubidium. Tijdens de productie van de buis wordt deze stof in de vorm van een plaatje aangebracht in de bovenkant van de buis. Als de buis helemaal klaar is wordt dit plaatje sterk verhit door middel van hoogfrequente wervelstromen. Het materiaal verdampt en slaat neer op de glaswand, waar het een kenmerkende spiegelende laag vormt. Tijdens dit proces worden de laatste gasmoleculen in de buis aan de reactieve stof gebonden.
In die buis wordt een gloeidraad aangebracht. Deze gloeidraad wordt ook wel het '*filament*' genoemd. Rond deze gloeidraad zit een metalen cilindertje dat dienst doet als kathode, met daaromheen op enige afstand een tweede cilindervormig metalen plaatje, de anode of plaat. Meestal is de kathode gemaakt van nikkel, bedekt met een laagje barium-strontiumoxide. De gloeidraad in het centrum van de kathode is door een laagje aluminiumoxide elektrisch van de kathode geïsoleerd, maar daarentegen is de warmtegeleiding tussen beide onderdelen zeer goed.
Deze twee-elektroden buis werd in 1904 gepatenteerd door de Engelsman John Fleming. De getekende allerfundamenteelste elektronenbuis met alleen een kathode en een anode wordt '*diode*' genoemd. Dat betekent '*buis met twee elektroden*' en deze van de Griekse woorden δι (di) en οδός (odós) afgeleide benaming voor een dergelijke elektronenbuis werd voor het eerst gebruikt door William Eccles in 1919.



De fundamentele samenstelling en het symbool van een diode.
(© Ch. Theodorou, geëdit door Jos Verstraten)

De diode in werking
Als u de gloeidraad aansluit op een spanning $U_{gloeidraad}$ wordt deze heet. Hierdoor wordt ook de kathode verwarmd tot een temperatuur van 700 à 800 °C. Het oppervlak krijgt daardoor een donkerrode kleur. Door de verwarming neemt de energie en dus de snelheid van de elektronen in de kathode-atomen toe. Een deel van de elektronen zal een snelheid krijgen die groter is dan de zogenaamde '*uittreed-snelheid*' en de kathode verlaten. Dit verschijnsel staat in de fysica bekend als '*thermische emissie*', ook bekend onder de naam '*Edison-effect*'. Er ontstaat dus een elektronenwolk, '*ruimtelading*' genoemd, rond de kathode. Deze elektronen vallen volledig willekeurig dan weer eens terug in een atoom dat een elektron tekort komt en worden even later daar weer uit gestoten. Deze chaotische toestand is stabiel.
Heel anders wordt de situatie als u een elektrische spanning U_{anode} aanlegt tussen de kathode en de anode. Als u de anode positief maakt ten opzichte van de kathode worden de negatief geladen elektronen uit de wolk aangetrokken tot de positieve anode en vliegen dwars door de leeg gezogen buis naar die metalen plaat. Er ontstaat een gesloten elektrische keten tussen de voeding, de kathode, de anode en de serieweerstand R1 die de stroom moet begrenzen.



De fundamentele werking van een diode-buis.
(© 2021 Jos Verstraten)

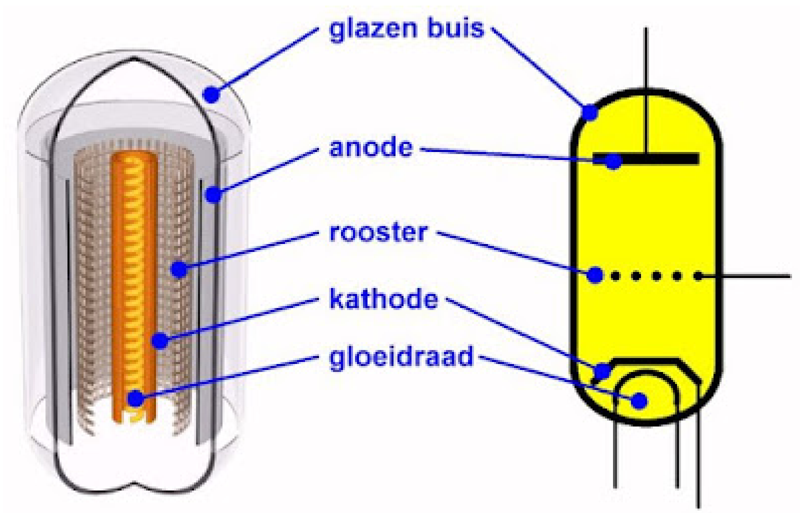
Twee tegengestelde stromen!
Er gaat dus een elektronenstroom door de buis vloeien van de kathode naar de anode. Let op dat deze stroom tegengesteld loopt aan de conventionele stroom die iedere elektronicus in de dagelijkse praktijk gebruikt. Deze loopt immers van de plus naar de min, dus tegen de elektronenstroom in. Als u dit verhaal van twee door dezelfde draad lopende tegengestelde

stromen maar raar vindt, dan hebt u het grootste gelijk van de wereld. Dat is echter historisch zo gegroeid.

Wat gebeurt er als u de polariteit omdraait?
Als u de voeding U_{anode} ompoolt, dus de min aan de anode en de plus aan de kathode, gebeurt er niets. De anode wordt immers niet verwarmd en er zit geen elektronenwolk rond deze elektrode. Er vloeit geen stroom door de buis.

Zeer belangrijke conclusie
Een elektronenbuis laat in slechts één richting stroom door en wel als de anode positief is ten opzichte van de kathode. Een dergelijke diode is inderdaad uitstekend geschikt als gelijkrichter en werd daar in het buizentijdperk ook voor gebruikt. De halfgeleider dioden hebben echter zoveel voordelen dat u een gelijkrichtende diode-buis op dit moment uitsluitend tegenkomt in installaties waar zeer hoge wisselspanningen worden gelijkgericht of in buizenversterkers waar, voor de show, ook de gelijkrichting van de trafospanning aan een buis wordt toevertrouwd.

De triode: toevoegen van één rooster
Het wordt pas écht spannend als u tussen de kathode en de anode een derde elektrode aanbrengt, opgebouwd uit een metalen spiraal gewikkeld met een grote spoed. Deze derde elektrode wordt het '*rooster*' genoemd of naar het Engels de '*grid*'. Deze triode werd in het jaar 1905, onafhankelijk van elkaar, uitgevonden door de Amerikaan Lee De Forest en door de Oostenrijker Robert von Lieben.



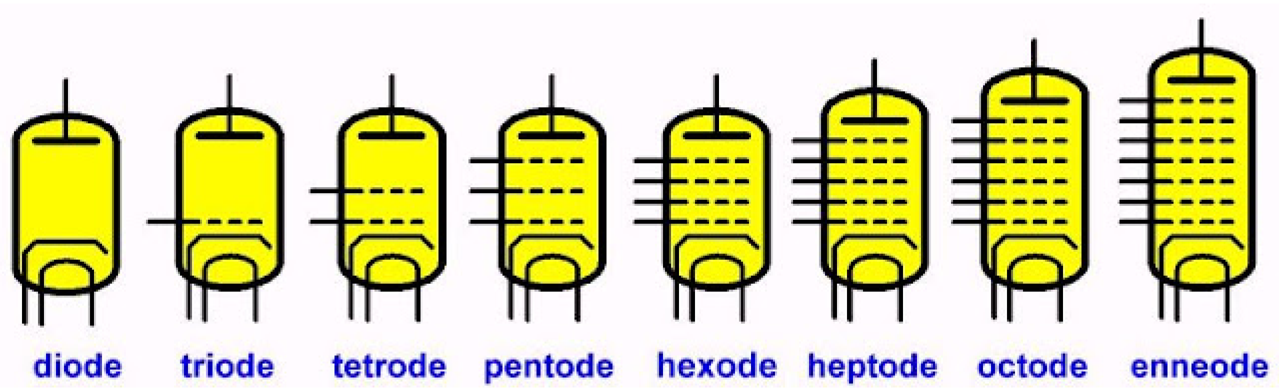
De fundamentele samenstelling en het symbool van een triode.
(© Ch. Theodorou, geëdit door Jos Verstraten)

De werking van een triode
Als u op dit rooster een gelijkspanning aansluit die negatief is ten opzichte van de kathode, dan zal het elektrostatisch veld tussen die twee elektroden het elektrostatisch veld tussen anode en kathode gaan beïnvloeden.
Met andere woorden: met de spanning tussen kathode en rooster kunt u de elektronenstroom tussen kathode en anode regelen. Als u de roosterspanning maar negatief genoeg maakt kunt u de buis zelfs '*dichtdrukken*'. Er vloeit dan helemaal geen elektronenstroom meer tussen de kathode en de anode.
Zet u bovendien een wisselspanning op het rooster, dan zal de anodestroom in het ritme van die wisselspanning gaan variëren. Op deze manier kunt u dus een triode gebruiken voor het versterken van een ***STROOM*** door het aanleggen van een wissel***SPANNING*** tussen rooster en kathode.

Hoe meer roosters, hoe meer vreugd
Naast de elektronenbuis met één rooster, de triode, heeft men buizen ontwikkeld met tot wel zeven roosters. Met dergelijke meer-rooster buizen kunt u allerlei complexe schakelingen

heel handig met één buis uitvoeren, zoals bijvoorbeeld het mengen van diverse signalen of het moduleren van een signaal met een ander signaal. Bovendien bepaalt het aantal roosters, zoals in de loop van dit artikel zal blijken, in grote mate hoe de stroom/spanning-karakteristiek van de buis er uitziet. Op dit moment wordt van deze buizen echter uitsluitend de penthode nog toegepast
In de onderstaande figuur hebben wij de symbolen en de benamingen van die meer-rooster buizen samengevat.
De roosters worden in de vakliteratuur aangeduid met diverse namen en symbolen:
- Eerste rooster: stuurrooster g1
- Tweede rooster: schermrooster g2
- Derde rooster: rem- of keerrooster g3

De overige roosters hebben geen specifieke benamingen.



Symbolen en benamingen van alle ontwikkelde buizen. (© 2021 Jos Verstraten)

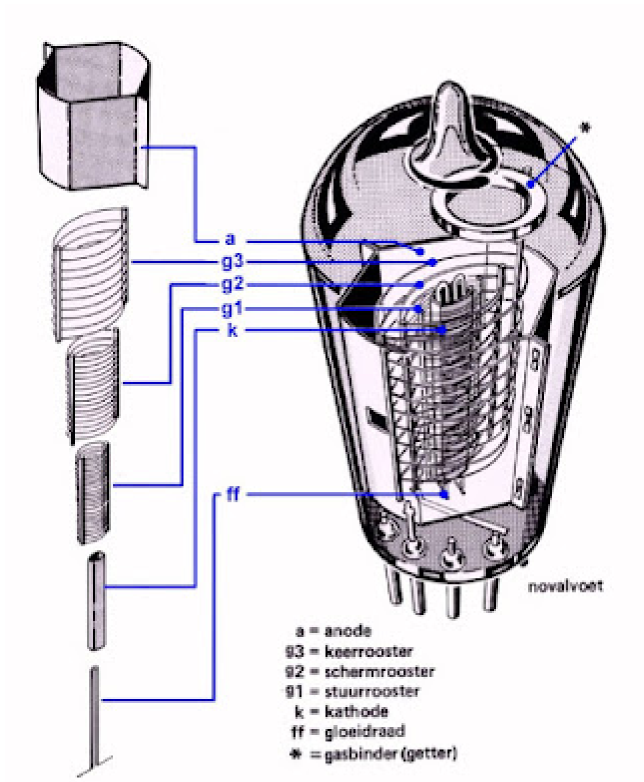
Hoe elektronenbuizen er uitzien
Het filament, de kathode, de anode en de diverse roosters moeten uiteraard buiten de glazen ballon beschikbaar zijn. Vandaar dat iedere elektronenbuis een zogenaamde '*buisvoet*' heeft met tot wel twaalf pennen zodat u spanningen op alle onderdelen kunt aansluiten. Het gaat in het kader van dit artikel te ver om alle uitvoeringen van elektronenbuizen te beschrijven. In de onderstaande foto zijn de uitvoeringen samengevat die tegenwoordig nog zeer courant zijn en die in de moderne audioversterkers met buizen worden toegepast. Van links naar rechts:

- **ECC83:**
  Een Europese dubbele triode die de standaard is in voorversterkers en toonregelingen.
- **EL84:**
  Een Europese penthode die vaak in eindversterkers met laag vermogen wordt toegepast.
- **EL34:**
  Dé Europese standaard penthode voor het samenstellen van audio eindversterkers in balansconfiguratie.
- **5881A:**
  Een Chinees/Russische eindversterker penthode die in vele opzichten een kloon is van de beroemde 6L6 die in 1936 werd ontwikkeld door de Amerikaanse RCA.
- **KT88:**
  Een penthode die op dit moment voornamelijk uit Rusland komt en die u ook nog vaak zult aantreffen in bijvoorbeeld basgitaar versterkers.



Het uiterlijk van nog vaak toegepaste buizen in audio-versterkers. (© 2021 Jos Verstraten)

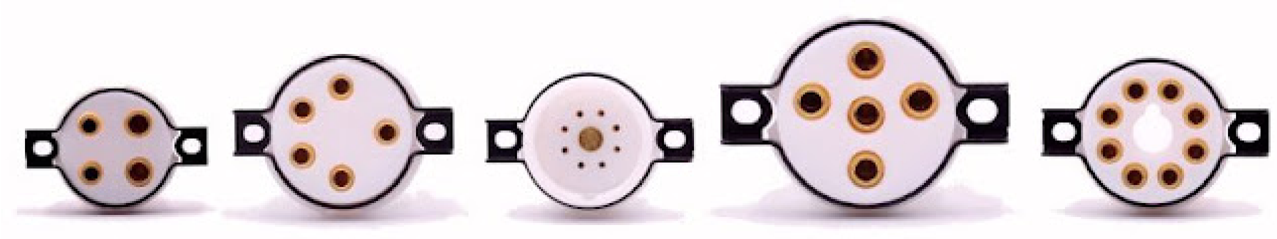
De anatomie van een penthode
Hoe een penthode is samengesteld ziet u in de onderstaande pentekening, met veel geduld en liefde gemaakt door L. M. Martin, de illustrator uit de jaren '80 van Elektuur/Elex. U ziet heel duidelijk hoe het filament, de kathode, de drie roosters en de anode in elkaar passen en hoe de elektronen van de kathode door de roosters naar de anode kunnen vliegen.



Het inwendige van een penthode ontleed. (© 1982 L. M. Martin)

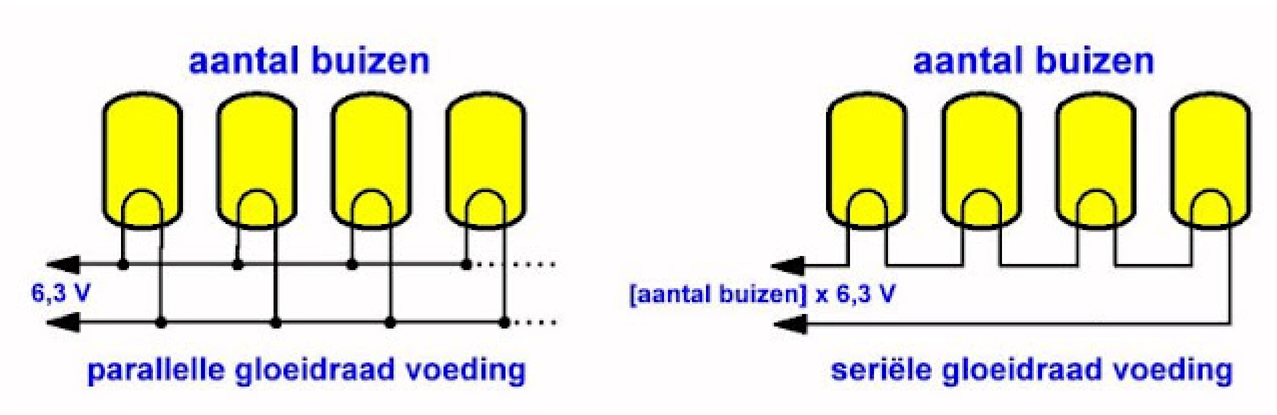
De buisvoeten
Zoals u op de bovenstaande foto ziet hebben buizen diverse manieren waarop de aansluitpennetjes naar buiten zijn gebracht. Er bestaan bijgevolg ook diverse soorten buisvoeten, waarvan de onderstaande foto er vijf laat zien. Buisvoeten bestaan zowel met

soldeerpennetjes voor printmontage als met soldeeroogjes voor chassismontage. Het lichaam kan ceramisch zijn, zoals op de voorbeelden of van pertinax (FR-2).



Vijf van de minstens twaalf soorten buisvoeten die bestaan. (© 2021 Jos Verstraten)

De gloeidraad voeding
De gloeidraad wordt bij de meeste buizen die nu nog worden gebruikt gevoed uit een spanning van 6,3 V. Dat kan gelijk- of wisselspanning zijn. U kunt alle gloeidraden dus parallel schakelen en aansluiten op een trafo die een secundaire spanning levert van 6,3 V. Het noodzakelijke vermogen kan echter flink oplopen. Een EL34 verbruikt bijvoorbeeld 1,5 A gloeistroom. In een stereoversterker met wat vermogen zitten vier tot acht van dergelijke buizen. In het laatste geval hebt u een trafo nodig die 6,3 V levert bij 12 A! Als u er ***absoluut zeker*** van bent dat alle buizen die u gebruikt in een ontwerp een identieke gloeistroom trekken kunt u de filamenten ook in serie schakelen en aansluiten op een hogere voedingsspanning. Dat scheelt heel wat in stroom die de trafo secundair moet kunnen leveren. In het genoemde voorbeeld van 8 x EL34 hebt u dan een trafo nodig die secundair 50 V levert bij een stroom van slechts 1,5 A.



Het voeden van de filamenten in parallel of in serie. (© 2021 Jos Verstraten)

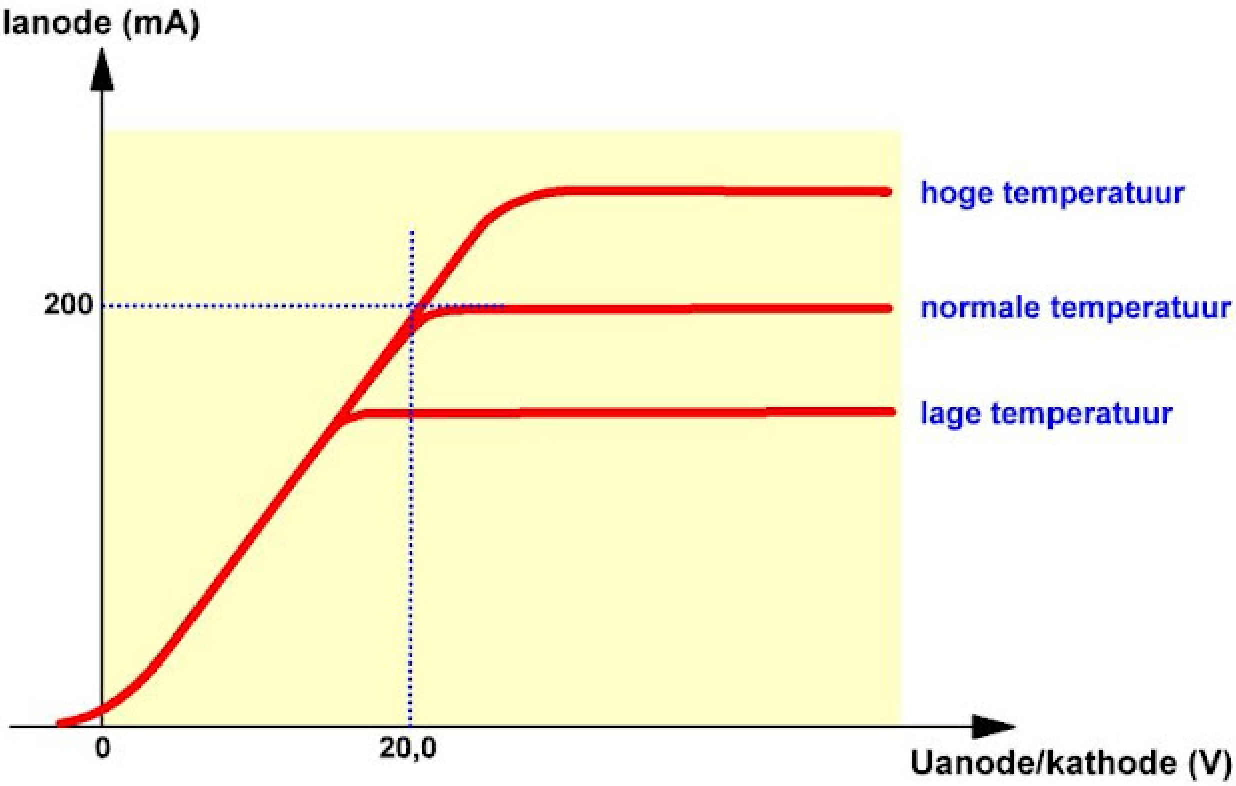
De gloeidraad voeding wordt meestal niet getoond
Dat een elektronenbuis een gloeidraad heeft is een eigenschap die onlosmakelijk met het onderdeel is verbonden. Dat u die gloeidraad warm moet stoken is dat ook. Voedingstransformatoren voor moderne buizenschakelingen hebben altijd twee wikkelingen. Op de eerste plaats een wikkeling van minimaal 250 V die na gelijkrichting de voedingsspanning voor de buizen levert, op de tweede plaats een wikkeling die 6,3 V levert en waarmee alle gloeidraden van de buizen worden gevoed. Omdat dit laatste zo standaard is wordt dit deel van de schakeling meestal niet in het schema getoond.

De voeding van een buizenschakeling
Gewend als u bent aan voedingsspanningen van +3,3 V tot maximaal +24 V zult u het misschien schokkend vinden als wij hierbij onthullen dat buizen daar absoluut geen genoegen mee nemen en dat u moet werken met voedingsspanningen van honderden volt.
Voorversterker trappen worden meestal gevoed uit een spanning van +250 V. Wij hebben echter een schema van een 60 W eindversterker gezien met 2 x KT88 penthodes die wordt gevoed uit een spanning van niet minder dan +480 V.
Dergelijke hoge gelijkspanningen zijn veel gevaarlijker dan wisselspanningen en kunnen, bij aanraking, flinke locale brandwonden veroorzaken. Verder hebt u te maken met elektrolyse-verschijnselen in uw weefsel op de plek waar u contact maakt met de hoge spanning. Opletten geblazen, dus!

Het gelijkrichten en afvlakken van de noodzakelijke hoge trafospanningen vereist uiteraard het gebruik van hoogspanningsdioden en elco's die tegen dergelijke hoge spanningen bestand zijn. Moderne silicium dioden, zoals de 1N4007, zijn zonder meer bruikbaar voor dergelijke hoge spanningen. In buizen eindversterkers kiest de ontwerper er echter vaak voor een dubbele diode-buis te gebruiken om in stijl te blijven met de andere buizen in het ontwerp.

De diode-buis nader bekeken

De stroom/anodespanning-karakteristiek van een diode-buis
Ook als er geen spanning op de anode aanwezig is zal er toch een kleine elektronenstroom door een diode vloeien. In de elektronenwolk die rond de kathode ontstaat zit een aantal elektronen die een zo grote uittreed energie hebben gekregen dat zij in staat zijn ook zonder veld naar de anode te vliegen. Om de stroom werkelijk nul te maken moet de anode dus op een kleine negatieve spanning worden ingesteld. Als u de anode echter aansluit op een positieve spanning en deze spanning langzaam verhoogt, dan zult u merken dat de elektronenstroom snel toeneemt.
Al bij een spanning van ongeveer +20,0 V op de anode komt de buis in verzadiging. Alle elektronen die door de kathode worden uitgestoten vliegen dan onmiddellijk naar de anode en de stroom kan niet stijgen. Hebt u grotere stromen nodig, dan kan dat alleen door het oppervlak van de kathode te vergroten of door de kathode heter te stoken. Dat laatste kan natuurlijk niet onbegrensd, dus een hogere stroom komt er in de praktijk op neer dat u een andere buis met een groter kathode-oppervlak moet kopen.
In de onderstaande figuur is het typische verloop van de stroom/anodespanning-karakteristiek van een diode-buis weergegeven.

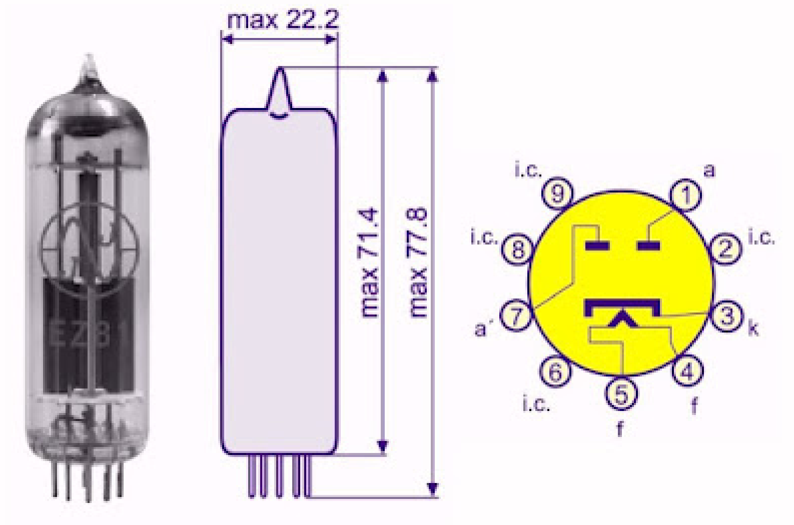


De stroom/anodespanning-karakteristiek van een diode-buis. (© 2021 Jos Verstraten)

Dubbele dioden zijn de standaard, de EZ81
Omdat in de voeding van buizenversterkers vrijwel steeds wordt gewerkt met een secundaire wikkeling met een middenaftakking hebt u steeds twee dioden nodig om deze trafo-spanningen gelijk te richten. Vandaar dat men een aantal dubbele dioden heeft ontworpen, speciaal bedoeld voor gebruik in de hoogspanningsvoeding van bijvoorbeeld een audio eindversterker. Een typisch voorbeeld van zo'n dubbele gelijkrichtdiode is de EZ81, waarvan

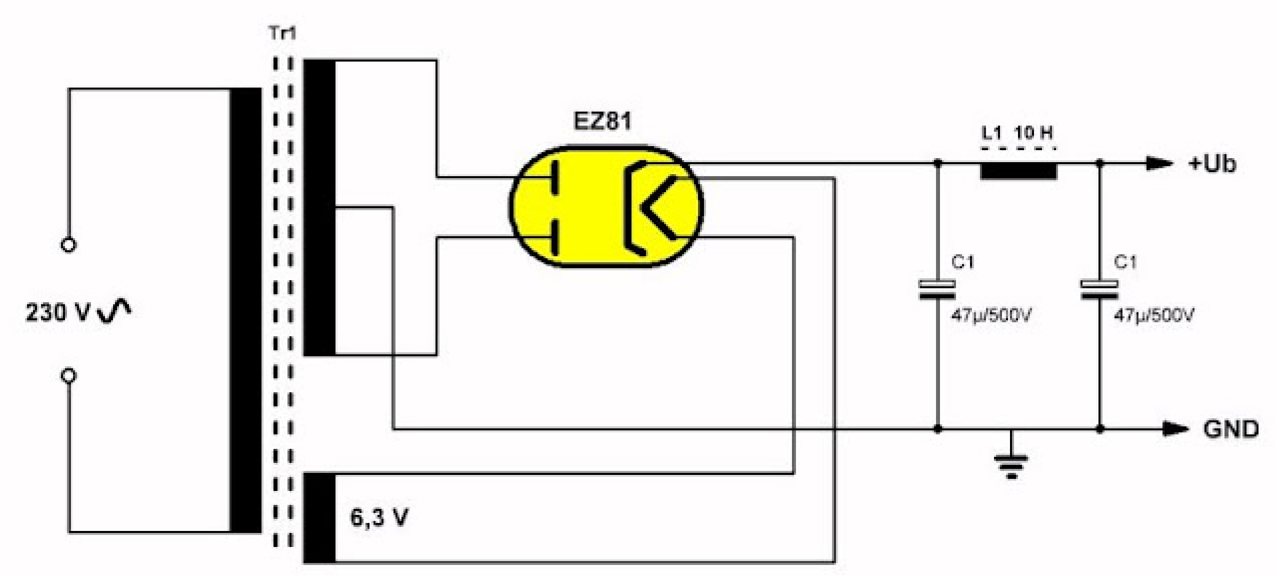
in de onderstaande figuur de aansluitgegevens zijn vermeld. Het om nostalgische motieven toepassen van een vacuümdiode als gelijkrichter kost u trouwens wel wat geld. Zo'n EZ81 kost u al gauw twaalf euro.
De voornaamste specificaties van deze buis zijn:

- **Buisvoet:** noval
- **Gloeidraad spanning:** 6,3 V
- **Gloeidraad stroom:** 1,0 A
- **Anodespanning:** 2 x 450 V max.
- **Inverse anodespanning:** -1.300 V max.
- **Anodestroom:** 500 mA max.
- **Capacitieve belasting:** 50 µF max.
- **Inductieve belasting:** 10 H max.



De gegevens van de EZ81 dubbele diode. (© jj-electronic)

De standaard schakeling van een hoogspanningsvoeding
In de onderstaande figuur is het standaard schema getekend van een hoogspanningsvoeding met een dubbele vacuüm-diode. Vergeleken met de bekende laagspanningsvoedingen valt een aantal zaken op. Op de eerste plaats de lage waarde van de afvlakelco's. Daar waar in transistorvoedingen vaak elco's van 2.200 µF of meer worden toegepast zult u in hoogspanningsvoedingen zelden meer dan 100 µF aantreffen. Wél moeten deze elco's een werkspanning van 500 V hebben! De prijs van dergelijke condensatoren valt mee, u betaalt er ongeveer zes euro per stuk voor. Ook bestaan er speciale dubbel-elco's, waarbij twee identieke elco's in één behuizing zitten met een gemeenschappelijke massa-aansluiting.



De EZ81 als gelijkrichter in een voeding. (© 2021 Jos Verstraten)

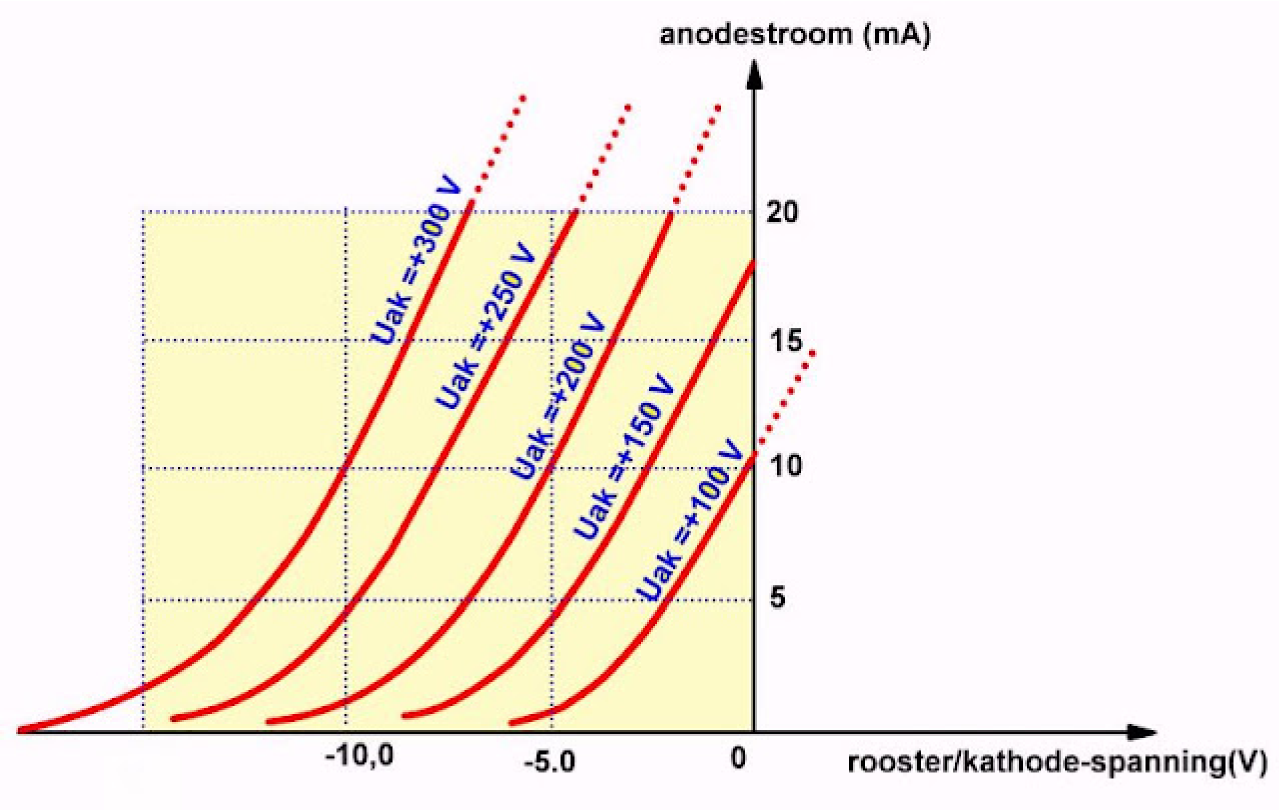
Op de tweede plaats valt op dat tussen de twee afvlakelco's een zware smoorspoel (*choke coil*) aanwezig is. Vaak treft u hier spoelen aan met een waarde van wel 10 H (*Henry*). Deze spoelen hebben een lage weerstand voor de gelijkspanning die over de eerste elco staat, maar een hoge impedantie voor de 100 Hz rimpel die op die gelijkspanning aanwezig is. Deze rimpel wordt dus flink verzwakt, waardoor over de tweede elco een gelijkspanning met een veel kleinere rimpel aanwezig is. Dergelijke onderdelen hebben de afmetingen en de prijzen van een forse voedingstrafo. Voor een smoorspoel van 10 H die 200 mA stroom kan verdragen betaalt u meer dan zestig euro.



De speciale elco en smoorspoel die u in een buizen voeding nodig hebt. (© 2021 Jos Verstraten)

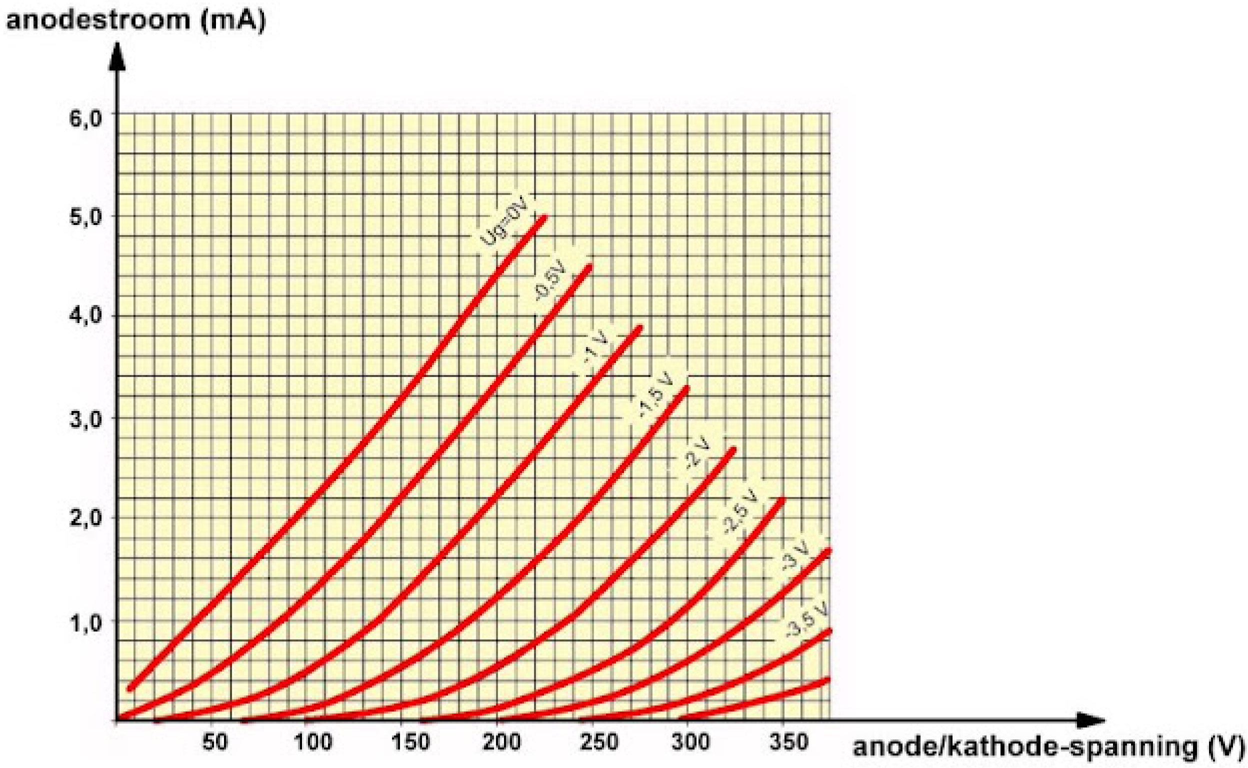
De triode-buis nader bekeken

De stroom/roosterspanning-karakteristiek van een triode-buis
Zoals reeds in de inleiding van dit artikel geschreven wordt het rooster ingesteld op een negatieve spanning ten opzichte van de kathode. Hoe negatiever deze spanning, hoe minder elektronen door de mazen van het grid gaan en hoe lager de elektronenstroom door de buis wordt. Dit kunnen wij weer in een overzichtelijke grafiek samenvatten. Echter, nu wordt niet het verband gegeven tussen de anodestroom en de anodespanning, maar tussen de anodestroom en de roosterspanning. Het zal duidelijk zijn dat de stroom echter ook wordt beïnvloed door de waarde van de anode/kathode-spanning U_{ak}. Hoe positiever de plaat is, hoe groter de aantrekkingskracht is die op de elektronen uit de kathodewolk wordt uitgeoefend en hoe meer elektronen door de tegenwerkende kracht van het rooster zullen breken. Beide gegevens worden verenigd in de grafiekenbundel van de onderstaande figuur. Deze grafiek wordt ook wel de '*transfer-karakteristiek*' genoemd.



De stroom/roosterspanning-karakteristiek van een triode. (© 2021 Jos Verstraten)

De stroom/anodespanning-karakteristiek van een triode-buis
Een tweede belangrijke karakteristiek is deze die het verband geeft tussen de anode/kathode-spanning en de stroom die door de triode vloeit. Omdat deze stroom ook wordt beïnvloed door de grootte van de rooster/kathode-spanning wordt deze grootheid bij de grafiek vermeld. Er ontstaat dan een bundel grafieken waarvan een voorbeeld in de onderstaande figuur is voorgesteld. Deze grafiek wordt ook wel de '*plaat-karakteristiek*' genoemd.



De stroom/anodespanning-karakteristiek van een triode. (© 2021 Jos Verstraten)

De versterkingsfactor μ van een triode
Het rooster ligt veel dichter bij de kathode dan de anode. Het gevolg is dat een variatie van de

rooster/kathode-spanning ΔU_{gk} een grotere invloed heeft op de elektronenstroom dan een identieke variatie in de anode/kathode-spanning ΔU_{ak}. De verhouding tussen deze beide veranderingen voor een identieke stroomverandering noemt men de versterkingsfactor, aangeduid met de letter μ.
In formulevorm wordt de versterkingsfactor gegeven door:
$\mu = \Delta U_{ak} / \Delta U_{gk}$
en wordt uitgedrukt in V/V. De versterkingsfactor is dus dimensieloos, wordt alleen gegeven door een bepaald getal onder eenheid.

De steilheid S van een triode
De verhouding tussen een kleine rooster/kathode-spanning verandering ΔU_{gk} en de daardoor veroorzaakte anodestroom verandering ΔI_a noemt men de steilheid (S) van de buis. Ook bij deze meting moet de anode/kathode-spanning constant blijven. Men noemt deze eigenschap de steilheid omdat een buis met een grotere steilheid ook steilere curves heeft in de in de vorige figuur getekende stroom/roosterspanning-karakteristiek. Een steilere buis zal dus ook meer versterking bieden.
De steilheid wordt in formulevorm geschreven als:
$S = \Delta I_a / \Delta U_{gk}$
en wordt uitgedrukt in mA/V. In de praktijk kan de steilheid variëren van 1 mA/V tot 100 mA/V, afhankelijk van de constructie van de buis.

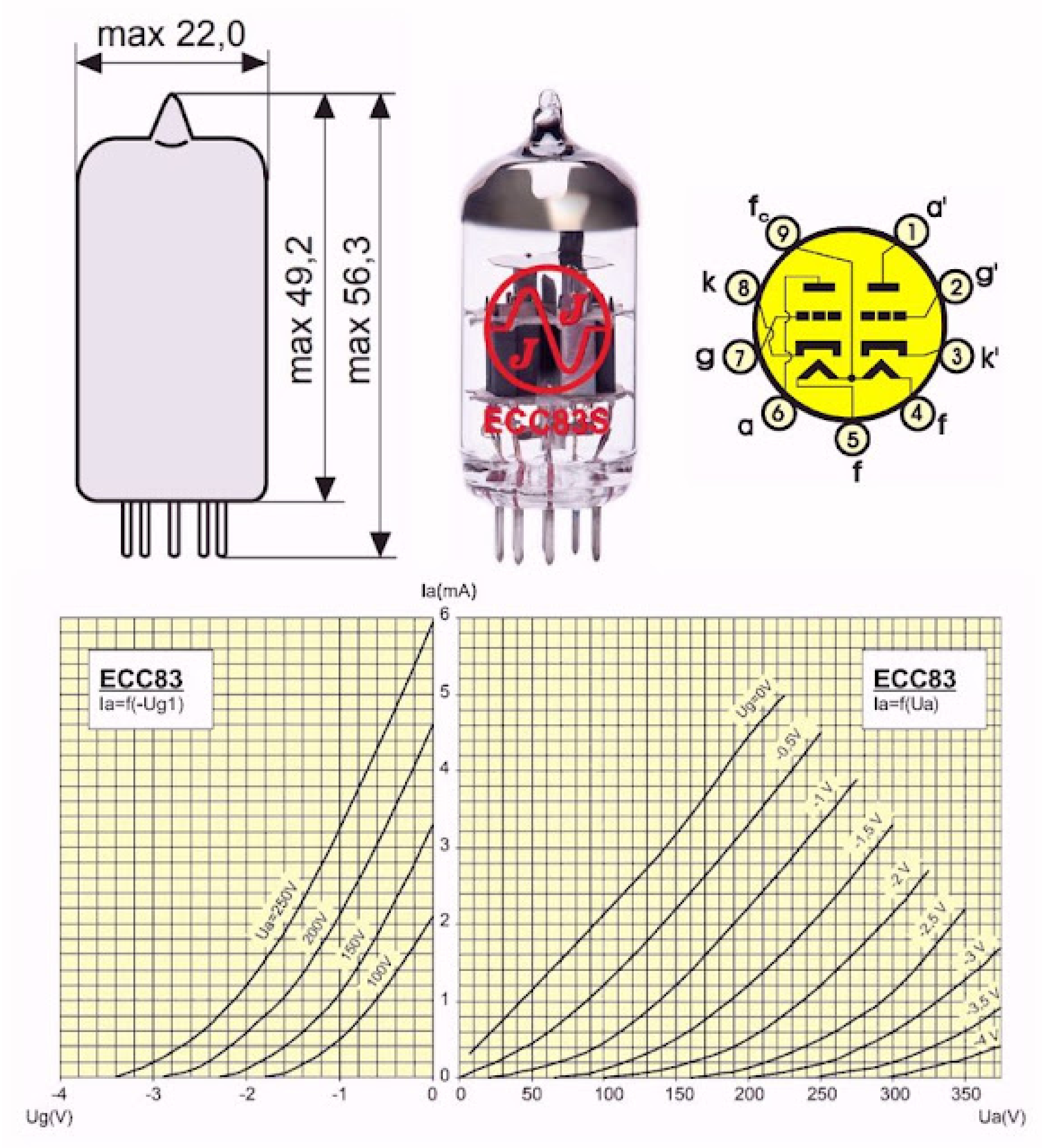
De inwendige weerstand R_i van een triode
De verandering in de anode/kathode-spanning ΔU_{ak} gedeeld door de verandering in de anodestroom ΔI_a definieert de inwendige weerstand R_i van de buis. Bij deze meting moet de rooster/kathode-spanning U_{gk} constant blijven.
De inwendige weerstand wordt in formulevorm geschreven als:
$R_i = \Delta U_{ak} / \Delta I_a$
en wordt uiteraard uitgedrukt in V/A of in Ω.

De wet van Barkhausen voor de triode-buis
Als u de steilheid vermenigvuldigt met de inwendige weerstand ontstaat de formule:
$S \bullet R_i = [\Delta I_a / \Delta U_{gk}] \bullet [\Delta U_{ak} / \Delta I_a]$
In deze formule mag u de factor ΔI_a boven en onder de streep tegen elkaar weg laten vallen.
Wat overblijft is:
$S \bullet R_i = \Delta U_{ak} / \Delta U_{gk} = \mu$
Of:
$\mu = S \bullet R_i$
De versterkingsfactor μ is altijd gelijk aan het product van de steilheid S en de inwendige weerstand R_i. Dat werd ontdekt door Heinrich Barkhausen en vandaar dat deze wetmatigheid door het leven gaat als de '*wet van Barkhausen*'.

De ECC83, dé standaard dubbel-triode voor audio
Een van de buizen die u vaak zult tegenkomen in audio voorversterkers is de ECC83. Dit is een Europese buis, die een aantal equivalenten heeft:

- De Amerikaanse equivalent 12AX7
- De Russische equivalent 5751
- De Chinese equivalent 7025

Deze buis wordt door audiofielen geprezen vanwege haar geringe vervorming en ruis en zeer weinig microfonie. '*Microfonie*' is een eigenschap van buizen waarbij mechanische trillingen invloed hebben op de werking van de buis. Door het trillen kunnen er microscopisch kleine afwijkingen ontstaan in de afstand tussen de diverse elektroden en daardoor variëren de elektrische velden in de buis in geringe mate op het ritme van de mechanische trillingen. Dit zou te horen kunnen zijn in de audio. In de onderstaande figuur zijn de aansluitgegevens en karakteristieken van deze dubbele triode samengevat. Zoals u ziet bevat deze buis twee volledig gescheiden systemen. U kunt de twee gloeidraden in serie of in parallel voeden.

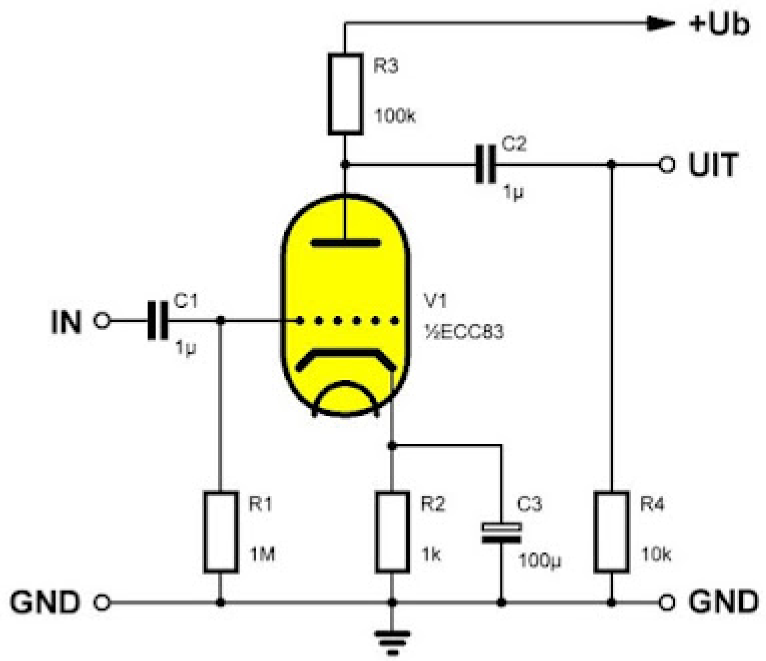


Aansluitgegevens en karakteristieken van de ECC83. (© jj-electronic.com)

De specificaties van de ECC83 in het kort samengevat:

- **Buisvoet:** noval
- **Gloeidraad spanning:** 6,3 V of 12,6 V
- **Gloeidraad stroom:** 300 mA of 150 mA
- **Anodespanning:** 300 V max.
- **Anodestroom:** 8 mA max.
- **Gedissipeerd vermogen:** 1 W max.
- **Roosterspanning:** -50 V min.
- **Kathode/filament-spanning:** 180 V max.
- **Steilheid S:** 1,6 mA/V typisch
- **Inwendige weerstand R_i:** 62,5 kΩ typisch
- **Versterkingfactor μ:** 100 typisch

Het basisschema van spanningsversterker met een triode
In de onderstaande figuur wordt het basisschema getoond van een signaalversterker rond een triode. Dit schema herkent u van een FET, geschakeld als signaalversterker. De werking van een triode als signaalversterker is inderdaad te vergelijken met de werking van een FET.

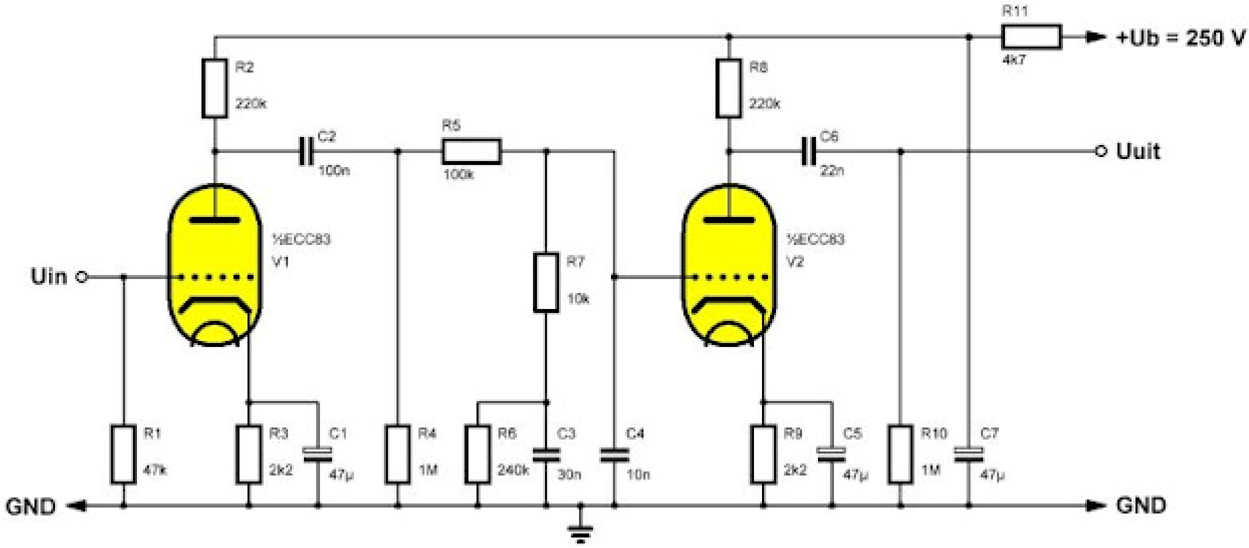


De triode als signaalversterker. (© 2021 Jos Verstraten)

De instelling van de trap komt automatisch tot stand op het moment dat u de voedingsspanning inschakelt. Op dat moment loopt er nog geen stroom door de buis en staan de kathode en het rooster op massapotentiaal. Nadat de gloeidraad de kathode heeft opgewarmd gaan de elektronen die zich rond de kathode ophouden door de gaten van het rooster naar de positieve anode vliegen. Er ontstaat dus een stroom door de buis die over de kathodeweerstand R2 een kleine spanning opbouwt. Hierdoor komt de kathode op een kleine positieve spanning te staan. Omdat het rooster via de weerstand R1 aan de massa ligt, staat deze elektrode dus op een kleine negatieve spanning ten opzichte van de kathode. Hierdoor gaat de elektronenstroom afnemen tot er een evenwicht is bereikt, voornamelijk bepaald door de waarde van de kathodeweerstand R2. De stroom die door de buis vloeit bouwt over de anodeweerstand R3 een bepaalde spanning op. De anode staat dus op een gelijkspanning die veel lager is dan de voedingsspanning.
Dit is de rustsituatie van de trap. U kunt nu op de ingang een kleine wisselspanning zetten. Dit signaal gaat door de condensator C1 en wordt aan het rooster aangeboden. De spanning op deze elektrode gaat dus variëren waardoor ook het spanningsverschil U_{gk} tussen het rooster en de kathode groter en kleiner wordt. Het variërend elektrisch veld tussen deze twee elektroden zorgt ervoor dat de elektronenstroom door de triode toeneemt en afneemt. De spanning op de anode gaat dus ook variëren en dit wisselspanningssignaal gaat via de scheidingscondensator C2 naar de uitgang.
Deze schakeling is dus een wisselspanningsversterker die het kleine signaal op de ingang tientallen malen versterkt op de uitgang zet.

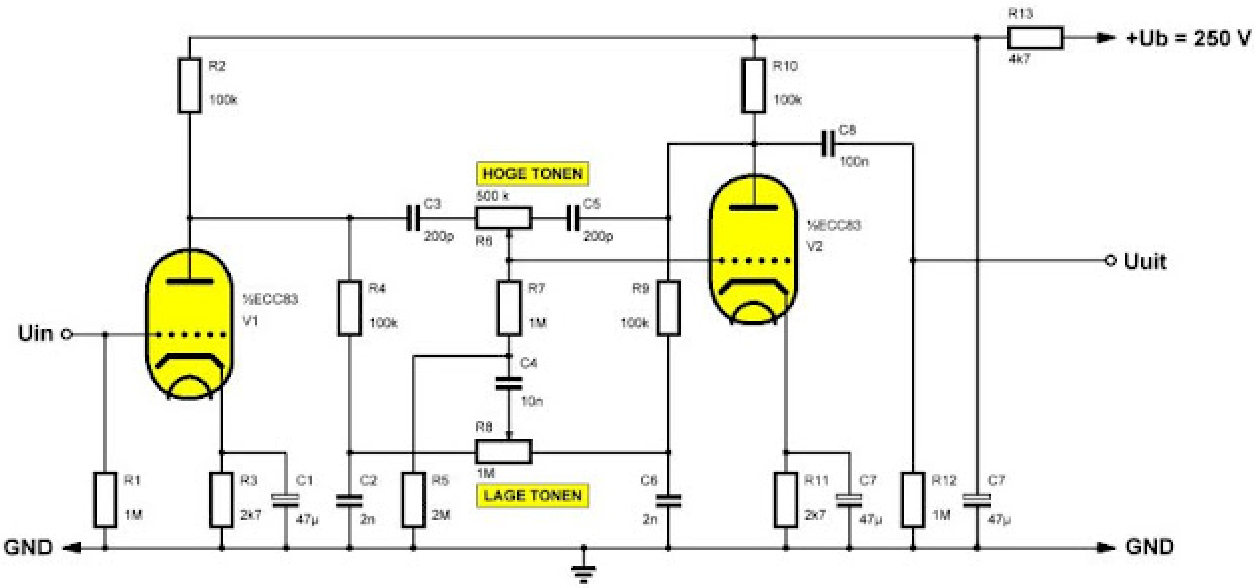
De ECC83 in een RIAA voorversterker

Met een ECC83 dubbel-triode kunt u op een heel eenvoudige manier een RIAA voorversterker voor een magneto-dynamische pick-up maken. Het schema is getekend in de onderstaande figuur. In feite bestaat dit schema uit twee simpele eentrap versterkers volgens het vorige schema waartussen een RC-netwerkje is opgenomen dat zorgt voor het zo goed mogelijk namaken van de RIAA-karaktertiek.



Een RIAA voorversterker met een ECC83. (© 2021 Jos Verstraten)

De ECC83 in een baxandall toonregeling
Uiteraard kunt u met twee stuks triodes de bekende baxandall schakeling voor het regelen van de hoge en de lage tonen nabouwen. Het onderstaand schema geeft een regelbereik van ±15 dB bij 50 Hz en bij 10 kHz. De versterking bedraagt 26 dB bij 1 kHz.



Een baxandall toonregeling met een ECC83. (© 2021 Jos Verstraten)

De penthode-buis nader bekeken

Van één naar twee roosters: de tetrode
De triode heeft een aantal nadelen. Zo vormen het rooster en de anode een vrijwel ideale condensator. Immers, het zijn twee elektroden die op een geringe afstand van elkaar staan met het luchtledige als diëlektricum. Door deze C_{ag} komt een klein deel van de anode wisselspanning terecht op het rooster. Dat is een terugkoppeling die onder bepaalde omstandigheden aanleiding kan geven tot oscilleren van de schakeling rond de triode.
Een tweede zwak punt van een triode is dat een variatie van de spanning tussen anode en kathode een vrij grote invloed heeft op de elektronenstroom door de buis.
Deze twee nadelen kunt u voorkomen door tussen het rooster en de anode een tweede rooster op te nemen, het zogenaamde '*schermrooster*'. Dat rooster wordt op een constante

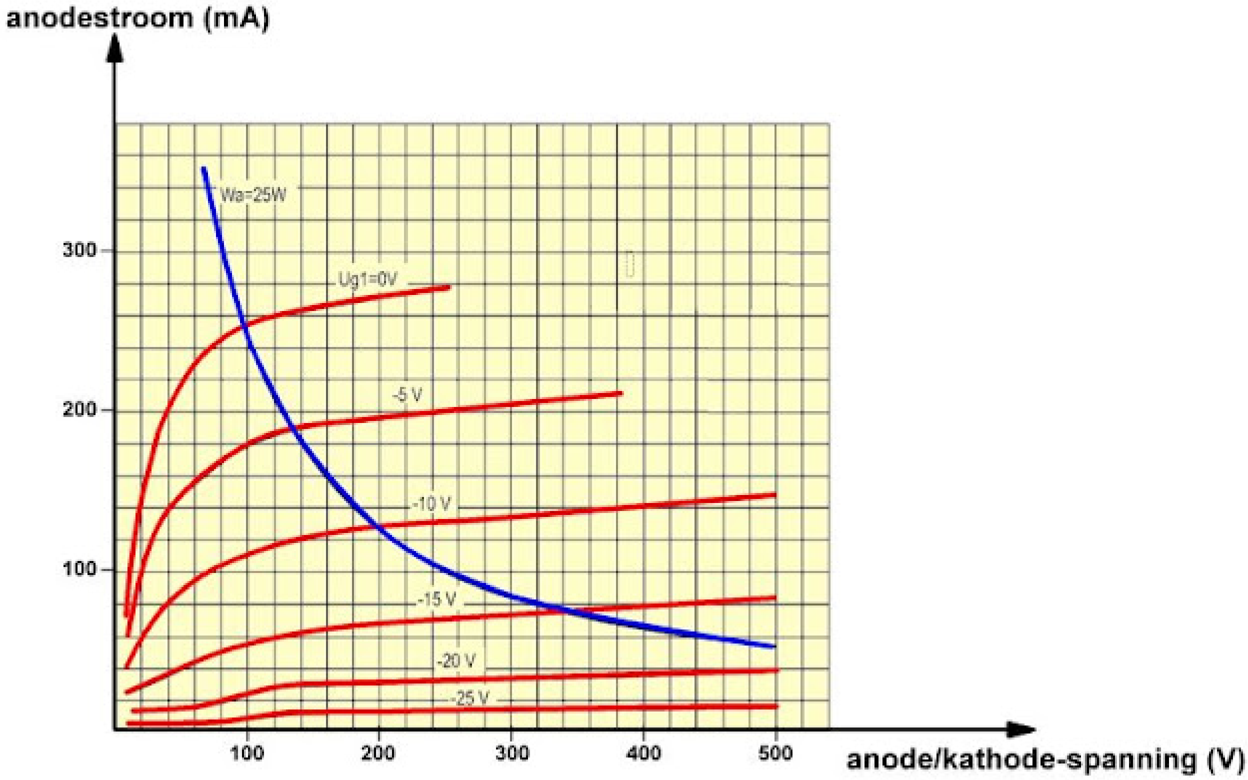
positieve spanning gelegd en zorgt voor een perfecte capacitieve scheiding tussen de anode en het stuurrooster. Bovendien zorgt dat tweede rooster ervoor dat de kathode de anode minder duidelijk '*ziet*' en de elektronenstroom minder wordt beïnvloed door de anodespanning.
Zo'n buis met twee roosters wordt '*tetrode*' genoemd maar wordt in de praktijk zelden toegepast. Door het introduceren van dit tweede rooster ontstaat namelijk weer een nadeel en dat heet '*secundaire emissie*'.

Van twee naar drie roosters: de penthode
Die '*secundaire emissie*' speelt voornamelijk in buizen waar de elektronen met grote snelheid van de kathode naar de anode vliegen. Dat is het geval bij buizen in eindversterkers waar met zeer hoge anodespanningen en -stromen wordt gewerkt. Als zo'n snel elektron op de anode terecht komt kan de grote inslag-energie er voor zorgen dat er uit de atomen van de anode elektronen worden losgeslagen. In een triode vallen deze elektroden even later terug op de anode en merkt niemand daar wat van. Bij een tetrode echter bestaat de kans dat deze elektronen op het schermrooster terecht komen. Dit zorgt voor een afname van de elektronenstroom naar de anode. Onder bepaalde omstandigheden kan die secundaire emissie en absorptie van die elektronen door het schermrooster zo groot worden dat de buis een negatieve inwendige weerstand krijgt met als gevolg dat zij een perfecte oscillator wordt.
Om dit nadeel te elimineren brengt men tussen de anode en het schermrooster een derde rooster aan, het '*keerrooster*' of '*remrooster'*. Dit derde rooster wordt vaak rechtstreeks met de kathode verbonden of wordt ingesteld op een constante kleine positieve spanning die veel lager is dan de anodespanning. De secundaire elektronen hebben nu de keuze tussen of op dit rooster neer te slaan of terug te keren naar de veel positievere anode. De meeste secundaire elektronen kiezen uiteraard voor de laatste optie. Hierdoor wordt de kans op plotselinge daling van de elektronenstroom en negatieve inwendige weerstand verkleind.

Een Nederlandse uitvinding
Het is misschien interessant om te vermelden dat de penthode in 1926 werd uitgevonden door de Nederlander Bernard Tellegen, medewerker van het Philips Natuurkundig Laboratorium (*NatLab*) te Eindhoven.

De stroom/roosterspanning-karakteristiek van een penthode-buis
Deze is vergelijkbaar met deze van een triode met dien verstande dat de bundel grafieken nu niet meer wordt bepaald door de grootte van de anode/kathode-spanning U_{ak}, maar door de grootte van de schermrooster/kathode-spanning U_{g2k}.

De stroom/anodespanning-karakteristiek van een vacuüm-penthode
Dat is heel ander verhaal! Door het aanbrengen van de twee extra roosters wordt de elektronenstroom door de buis vrijwel onafhankelijk van de grootte van de anode/kathode-spanning. Zelfs als de anode maar iets positiever is dan de kathode zullen vrijwel alle door de kathode uitgezonden elektronen op de anode terecht komen. De typische $I_a = f(U_{ak})$ karakteristiek van een penthode, weergegeven in de onderstaande figuur, lijkt dan ook erg op de $I_c = f(U_{ce})$ karakteristiek van een bipolaire transistor.



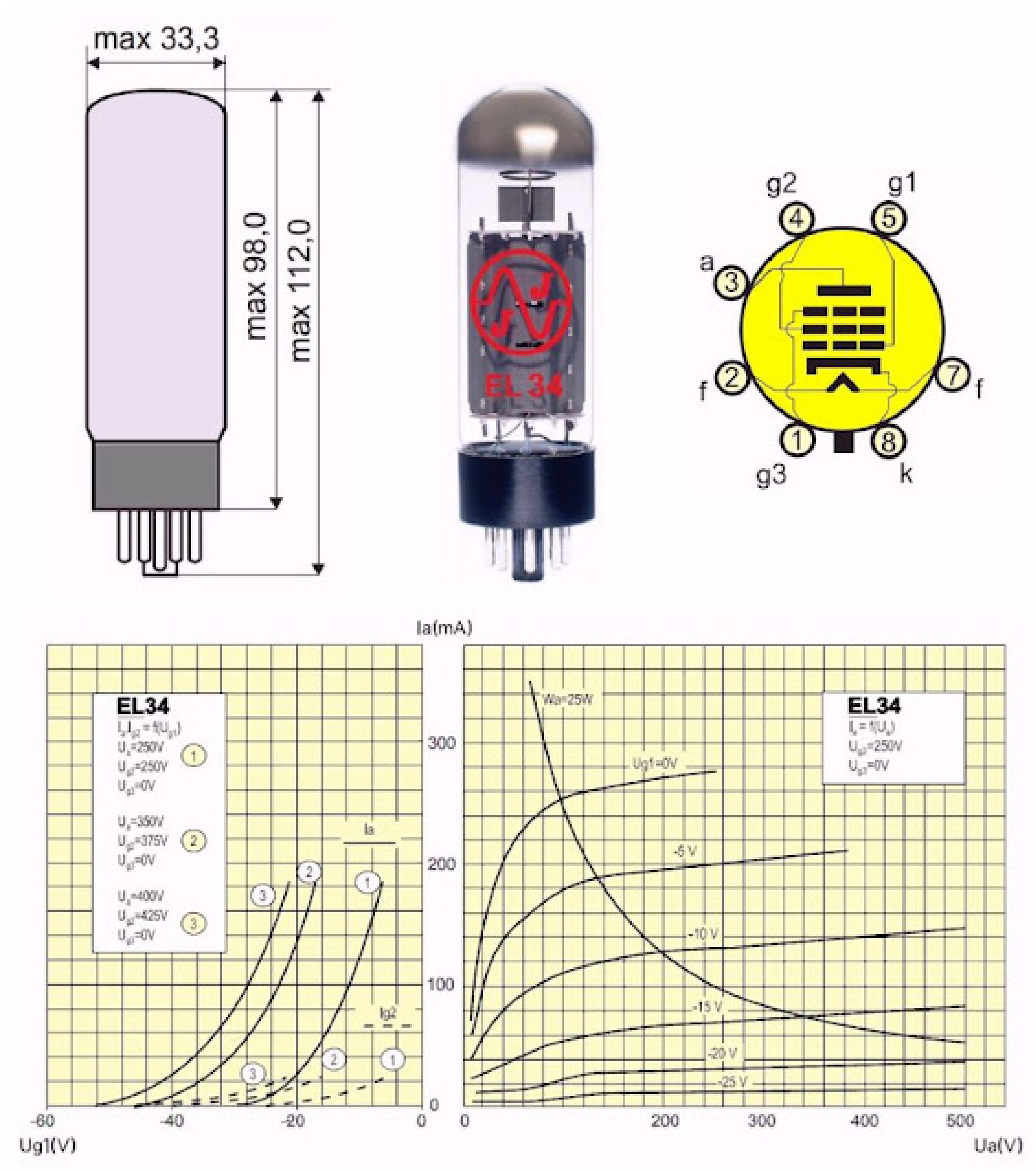
De stroom/anodespanning-karakteristiek van een penthode. (© 2021 Jos Verstraten)

De inwendige weerstand R_i van een penthode
Uit de in de bovenstaande figuur voorgestelde bundel grafieken kunt u afleiden dat de inwendige weerstand van een penthode veel hoger is dan deze van een triode. Immers, de inwendige weerstand is gelijk aan de verandering van de anode/kathode-spanning gedeeld door de verandering in de anodestroom. In formulevorm:

$R_i = \Delta U_{ak} / \Delta I_a$

Een grote ΔU_{ak} heeft bij een penthode een kleine ΔI_a tot gevolg. De inwendige weerstand is dus groot.

De EL34, dé standaard penthode voor audio eindversterkers
In de meeste Europese schema's van audio eindversterkers zult u een of meerdere EL34 buizen tegenkomen. Deze buis wordt zowel toegepast in klasse-A versterkers als in klasse-AB balans-versterkers. Een paar van de talloze equivalenten en/of namaaksels zijn: 6CA7, KT77, S4GB.
In de onderstaande figuur zijn de aansluitgegevens en de karakteristieken van deze penthode samengevat.



De gegevens van de EL34. (© jj-electronic)

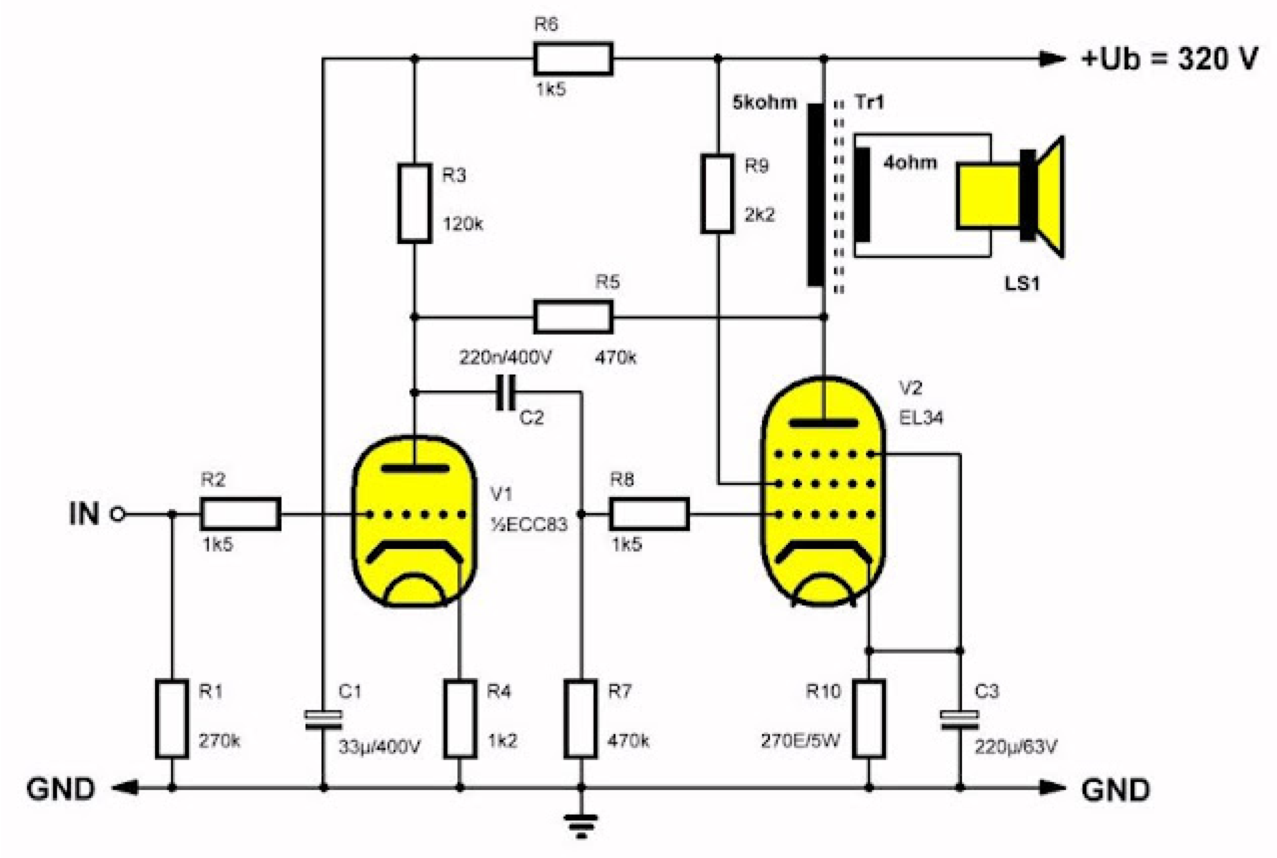
De voornaamste specificaties zijn:

- **Buisvoet:** octal
- **Gloeidraad spanning:** 6,3 V
- **Gloeidraad stroom:** 1,5 A
- **Anodespanning:** 800 V max.
- **Anodestroom:** 150 mA max.
- **Tweede rooster spanning:** 450 V max
- **Gedissipeerd vermogen:** 25 W max.
- **Eerste rooster spanning:** -16,5 V min.
- **Kathode/filament-spanning:** 100 V max.

Uitgangstrafo altijd noodzakelijk
Omdat eindversterkers met buizen werken met hoge spanningen en grote signalen is het onmogelijk rechtstreeks de 4 Ω tot 16 Ω impedanties van de standaard luidsprekers aan te sturen. U moet dus altijd een uitgangstrafo tussen de eindbuis en de luidspreker opnemen.

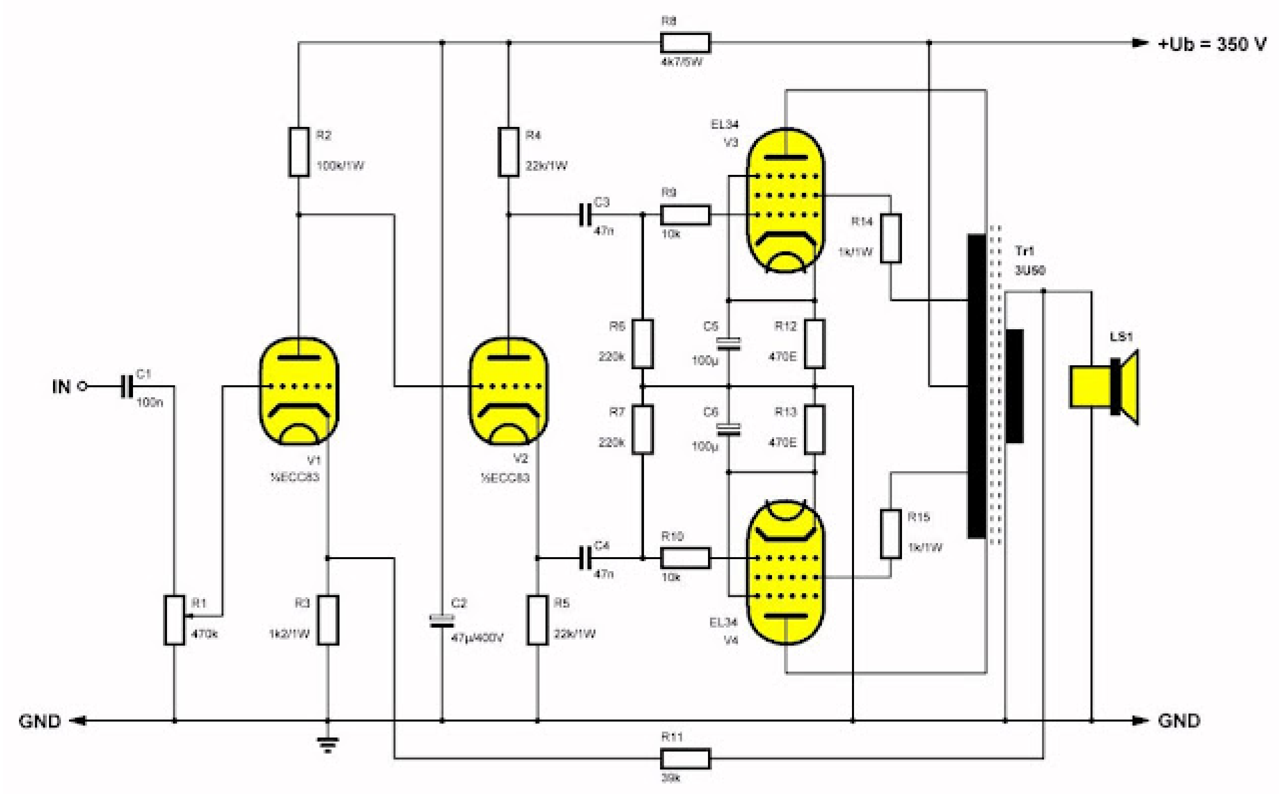
De EL34 in een klasse-A eindversterker
In onderstaande figuur is een EL34 opgenomen in een simpele eindversterker in klasse-A. Klasse-A betekent dat er altijd een ruststroom door de penthode vloeit. Deze stroom wordt gemoduleerd op het ritme van het te versterken signaal. Deze variërende stroom wekt in de

kern van de uitgangstrafo Tr1 een wisselend magnetisch veld op. Dit veld genereert in de secundaire wikkeling van de trafo een lage wisselspanning die echter in staat is flink wat stroom naar de luidspreker te sturen.
De weerstand R5 zorgt voor een bepaalde mate van terugkoppeling van de tweede trap naar de eerste trap.



De EL34 in een klasse-A eindversterker. (© 2021 Jos Verstraten)

De EL34 in een klasse-AB balans-eindversterker
Bij een dergelijke versterker wordt een trafo met primaire middenaftakking toegepast. Iedere halve wikkeling wordt gestuurd door één EL34. Het onderstaande schema beschrijft een 50 W eindversterker.



Twee stuks EL34 in een klasse-AB eindversterker. (© 2021 Jos Verstraten)

De stuurroosters van beide eindbuizen moeten in tegenfase worden gestuurd en worden dus gevoed uit een fasesplitser. In dit schema is dat de rechter helft van de dubbelde triode. In de kathode en de anode staan twee even grote weerstanden. Als de stroom door de buis stijgt, zal de kathodespanning stijgen en de anodespanning met dezelfde waarde dalen. De signalen op kathode en anode zijn dus even groot, maar in tegenfase. Deze twee signalen sturen de beide eindpenthodes.
De terugkoppeling wordt, vreemd genoeg, uitgevoerd vanaf de secundaire kant van de uitgangstrafo. Het is dan noodzakelijk dat deze wikkeling met één aansluiting verbonden is met de massa van de versterker.